

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

Кафедра фізики та астрономії

**Кваліфікаційна робота**

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**«Комплекс автоматичної реєстрації вольт-амперних характеристик напівпровідникових структур»**

“A complex for automatic recording of volt-ampere characteristics of semiconductor structures ”

Виконав: здобувач денної форми навчання спеціальності 151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Освітня програма Комп'ютерна обробка та аналіз даних  
Дукаценко Олександр Станіславович

Керівник к.ф.-м.н., доц. Маслєєва Н.В. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент доц. Горбачов В.Е.

Рекомендовано до захисту:  
протокол засідання кафедри  
фізики та астрономії  
№ \_\_\_ від \_\_\_\_.\_\_\_\_. 20\_\_ р.  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ  
(підпис)

Захищено на засіданні ЕК № \_\_\_\_\_  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_.\_\_\_\_. 20\_\_ р.  
Оцінка \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)  
Голова ЕК  
\_\_\_\_\_ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ  
(підпис)

Одеса 2025

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР У АВТОМАТИЧНОМУ РЕЖИМІ .....</b>	<b>4</b>
1.1 Формування вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів та методи її вимірювання.....	4
1.2 Аналіз структури та схем автоматичних комплексів для вимірювання електричних характеристик. ....	7
1.3 Особливості вимірювання струму та вибір підсилювача.....	9
<b>2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАПISУ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ .....</b>	<b>12</b>
2.1 Особливості програми LabVIEW для автоматизованого вимірювання електричних характеристик напівпровідникових діодів .....	12
2.2 Методика вимірювання вольт-амперних характеристик діодів на основі <i>GaAs</i> .....	13
2.3 Вибір елементної бази для системи автоматизованої реєстрації.....	15
2.4 Опис принципової схеми для автоматизованого вимірювання ВАХ.....	17
2.5 Аналіз ВАХ діодів на основі <i>GaAs</i> .....	18
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>21</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>22</b>

## ВСТУП

У сучасній електроніці активно використовують напівпровідникові матеріали і структури. Однією з найважливіших характеристик таких елементів є вольт-амперна характеристика, яка встановлює залежність струму від прикладеної напруги. Знання вольт-амперних характеристик необхідно для аналізу якості, деградаційної стійкості, прогнозування працездатності напівпровідникових пристроїв та створення нових, більш досконалих приладів.

Для точного й швидкого дослідження електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів необхідні автоматизовані комплекси, здатні вимірювати вольт-амперні характеристики з високою точністю, достовірністю та повторюваністю. Такі системи повинні забезпечувати не лише збір даних, а й обробку результатів, збереження результатів вимірювань та візуалізацію отриманих залежностей.

Метою дипломної роботи є розробка та створення доступного, простого у використанні, безпечного й водночас точного автоматизованого комплексу для реєстрації вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано фізичні основи формування вольт-амперних характеристик діодів; сучасні програми, методи та технічні засоби вимірювання вольт-амперних характеристик, структурні й функціональні схеми різних автоматизованих комплексів.

При виконанні роботи було створено експериментальну установку для вимірювання ВАХ в автоматичному режимі, проведені дослідження ВАХ діодів на основі арсеніду галію.

# 1. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР У АВТОМАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

## 1.1. Формування вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів та методи її вимірювання

Вольт-амперна характеристика напівпровідникових структур - це залежність між силою струму та прикладеною до пристрою напругою. Вона є результатом взаємодії носіїв заряду (електронів і дірок) з потенційними бар'єрами, неоднорідностями кристалічної решітки та іншими фізичними параметрами середовища. У випадку р-п переходу, який є базовим елементом напівпровідникових приладів, вольт-амперна характеристика має нелінійний характер і залежить від багатьох факторів: температури, концентрації домішок, геометрії переходу тощо [1]. Властивості електронно - діркового переходу наглядно ілюструються його ВАХ, яка показує залежність струму через р-п перехід від величини і полярності прикладеної напруги. Аналітичний вираз для визначення величини струму ідеального р-п переходу має такий вигляд:

$$I = I_s (\exp qU/kT - 1) \quad (1)$$

де  $I_s$ - зворотній струм насичення р-п переходу (визначається фізичними властивостями напівпровідникового матеріалу),  $U$  - напруга прикладена до р-п переходу,  $q$  - заряд електрону,  $k$  - стала Больцмана,  $T$  - абсолютна температура р-п переходу [7].

При прямому зміщенні р-п переходу опір зменшується, струм зростає експоненціально. У зворотному напрямку опір зростає, а струм обмежується незначними витоками, аж до моменту пробоя. Така поведінка дозволяє використовувати р-п переходи для випрямлення

змінного струму, створення діодів, транзисторів, стабілітронів, фотосенсорів.

Властивості р-n переходу суттєво залежать від температури навколишнього середовища[1]. При підвищенні температури зростає генерація пар носіїв заряду електронів і дірок, тобто збільшується концентрація неосновних носіїв і власна провідність напівпровідника.

При збільшенні температури концентрація неосновних носіїв зарядів зростає за експоненціальним законом. За цим законом зростає і струм насичення.

ВАХ є ключовим показником електричної поведінки напівпровідникових структур. Вона дозволяє виявити лінійні, нелінійні або бар'єрні ефекти провідності структури.

У напівпровідниках процес провідності зумовлений переміщенням носіїв заряду - електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні. В області р-n переходу виникає внутрішнє електричне поле, яке спричинює рекомбінацію носіїв, що створює характерну нелінійність на графіку ВАХ. На ВАХ добре видно точку пробою, насичення струму і область лінійного приросту. Ці особливості мають критичне значення при проектуванні напівпровідникових пристроїв.

Існує кілька методів вимірювання вольт-амперної характеристики:

1. Ручний метод з використанням джерела живлення, амперметра і вольтметра;
2. Напівавтоматичний - з побудовою графіків за даними вимірювань;
3. Автоматизований - із застосуванням мікроконтролерів, цифро-аналогових і аналог-цифрових перетворювачів, інтерфейсів передачі даних.

Найточнішим і найшвидшим є останній, оскільки дозволяє оперативно змінювати вхідні параметри, фіксувати результати з високою частотою дискретизації та виводити графік вольт-амперної характеристики в режимі реального часу. В автоматизованих системах вимірювання інтегруються в

програмно-апаратні комплекси, які керуються мікроконтролерами типу STM32, Arduino або Raspberry Pi [3].

На підставі проведеного аналізу можна сформулювати основні вимоги до комплексу автоматичної реєстрації ВАХ [1].

1. Забезпечення стабільної подачі напруги в заданому діапазоні (0–5 В);
2. Вимірювання струму в діапазоні до 20 мА з точністю не менше 0,1 мА;
3. Побудова графіка вольт-амперної характеристики в режимі реального часу;
4. Автоматичне збереження результатів вимірювання на зовнішній носій або в пам'ять ПК;
5. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача;
6. Захист елементів від перевантаження та зворотної полярності.

Реалізація зазначених вимог можлива за рахунок використання сучасної мікроелектронної бази, зокрема мікроконтролерів STM32, цифро-аналогових та аналого-цифрових перетворювачів, елементів захисту та цифрових інтерфейсів зв'язку.

Сьогодні на ринку представлено кілька комерційних систем для вимірювання ВАХ: **Keithley**, **Tektronix**, **NI LabView-DAQ**, але вони мають високу вартість і зазвичай вимагають складного налаштування. Доступніші рішення базуються на платформах відкритого типу, до них відносять :

1. STM32 із вбудованим АЦП [2];
2. Arduino з бібліотеками для керування DAC/ADC [7];
3. Raspberry Pi з підтримкою Python та Plotly для візуалізації [3].

У таблиці 1 наведено дані про точність і швидкість різних систем для вимірювання ВАХ в автоматичному режимі.

**Таблиця 1.** Порівняльні характеристики різних систем для вимірювання ВАХ.

<b>Система</b>	<b>Точність</b>	<b>Швидкість</b>
Keithley 2400	$\pm 0.01\%$	Висока
Arduino + INA219	$\pm 1\%$	Середня
STM32 + ADC	$\pm 0.2\%$	Висока

### **1.2. Аналіз структури та схем автоматичних комплексів для вимірювання електричних характеристик.**

Перед початком проектування комплексу автоматичної реєстрації вольт-амперної характеристики напівпровідникових структур необхідно сформулювати загальні принципи його побудови. Враховуючи вимоги до точності, повторюваності та безпечності вимірювань, структура комплексу повинна забезпечувати повністю автоматизований цикл: подачу керованої напруги на зразок, реєстрацію відповідного струму, обробку результатів та виведення графіків. Для цього потрібна реалізація зворотного зв'язку між апаратною частиною та програмним забезпеченням.

Базова логіка побудови системи включає в себе джерело живлення, яке забезпечує плавне регулювання напруги, систему вимірювання струму, цифровий блок управління (зазвичай мікроконтролер або вбудований комп'ютер) та модуль візуалізації результатів [13].

Всі складові мають працювати синхронно, що потребує розробки

відповідного алгоритму взаємодії. Такий підхід дозволяє проводити вимірювання ВАХ в автоматичному режимі, з мінімальною участю оператора, що значно знижує ймовірність помилки й підвищує продуктивність досліджень.

Автоматизований комплекс для реєстрації вольт-амперних характеристик напівпровідникових структур повинен мати модульну архітектуру, яка забезпечує гнучкість, масштабованість і простоту обслуговування. Умовно, комплекс складається з наступних основних блоків [12]:

1. Джерело живлення з регульованою напругою;
2. Тестований напівпровідниковий зразок;
3. Вимірювальні модулі струму та напруги;
4. Мікроконтролерна система керування;
5. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП);
6. Комунікаційний інтерфейс (USB або UART);
7. Персональний комп'ютер (або дисплей) для виведення результатів.

Одним із критично важливих елементів комплексу є джерело живлення, яке подає напругу на досліджувану структуру. Для забезпечення плавної зміни напруги в межах 0–5 В з мінімальними пульсаціями часто обирають джерело на базі програмованого модуля з цифровим керуванням, наприклад, Agilent E3631A. Цей блок живлення має можливість керування через інтерфейс USB або GPIB, що дозволяє використовувати протокол SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) для точного задання параметрів з програмного середовища.

Обов'язковою умовою є стабільність вихідної напруги та наявність захисту від короткого замикання або перенапруги, що особливо важливо при роботі з чутливими зразками. Джерело живлення також повинно

підтримувати швидкий відгук на команди з боку ПЗ для побудови реальної динаміки процесу вимірювання.

Апаратні компоненти вибираються на основі наступних вимог [13]:

1. Джерело живлення - стабілізований блок на базі ШІМ-контролера з можливістю регулювання напруги у межах 0 - 5 В;
2. Мікроконтролер - STM32F103 (або аналогічний), оскільки має достатню кількість портів введення/виведення, інтегрований АЦП з високою точністю (до 12 біт) і підтримує інтерфейси USB/UART для зв'язку з ПК;
3. Аналого-цифрові перетворювачі - використовуються вбудовані у мікроконтролер або зовнішні, якщо потрібна більша точність (наприклад, ADS1115);
4. Модуль вимірювання струму - шунт з операційним підсилювачем (наприклад, INA219), який дозволяє точно визначати струм у міліамперному діапазоні;
5. Захисні елементи - діоди, резистори та варистори для запобігання перенапругам, коротким замиканням і зворотній полярності;
6. Дисплей або ПК - для виводу графіка вольт-амперної характеристики та керування експериментом через простий GUI (графічний інтерфейс).

### 1.3. Особливості вимірювання струму та вибір підсилювача

Для забезпечення точності вимірювання слід дотримуватися низького опору з'єднань, екранування сигнальних ліній, а також реалізувати фільтрацію шумів (наприклад, через RC-фільтри). Значення струму фіксується на кожному кроці зміни напруги та зберігається в пам'яті мікроконтролера або передається через інтерфейс на комп'ютер.

Перевагою сучасних підсилювачів струму є вбудовані інтерфейси обміну, що дозволяє уникнути помилок під час аналогово-цифрового перетворення та зменшити кількість зовнішніх компонентів у схемі. Це позитивно впливає на розміри пристрою та його надійність.

Усі обрані модулі повинні бути логічно об'єднані у єдиний функціональний комплекс. Для цього розробляється загальна схема, яка показує послідовність та спосіб з'єднання апаратних компонентів. У центрі - мікроконтролер STM32, який керує цифро-аналоговим перетворювачем (DAC) для генерації напруги, фіксує значення струму з ADC або зовнішнього приладу, а також координує передачу даних на комп'ютер через USB/UART.

Кожен блок (джерело, вимірювач струму, інтерфейс) повинен мати окрему гілку живлення з фільтрацією, а також системи захисту від перевантажень. У структурі також реалізується кнопка аварійної зупинки та індикатори стану (LED), які сигналізують про хід експерименту або помилки в роботі.

Для зручності схема включає логічні точки тестування, де оператор може підключити осцилограф або мультиметр. Такий рівень деталізації дозволяє досліднику як відслідковувати усі етапи експерименту, так і швидко усунути потенційні несправності без складного аналізу коду чи повного демонтажу системи.

Для повноцінного функціонування комплексу планується реалізація програмного забезпечення у середовищі Arduino IDE або STM32Cube IDE, яке забезпечує керування вимірюваннями, обробку сигналів та передачу даних.

Основні модулі Програмного забезпечення (ПЗ):

- 1.Модуль керування скануванням напруги;
- 2.Модуль вимірювання струму та напруги
- 3.Обробка та фільтрація сигналів;
- 4.Передача даних через UART або USB;
- 5.Виведення графіка на ПК.

Таким чином, розроблений комплекс має модульну будову, просту реалізацію та високу функціональність. Наступним етапом буде обґрунтування вибору компонентів та розрахунок ключових електротехнічних параметрів, що буде розглянуто в наступному розділі.

## **2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАПИСУ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ**

### **2.1. Особливості програми LabVIEW для автоматизованого вимірювання електричних характеристик напівпровідникових діодів**

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) - це сучасне графічне середовище програмування, яке розроблено спеціально для вимірювань, автоматизації експериментів, збору, обробки й візуалізації даних у режимі реального часу. Завдяки зручності та гнучкості ця програма стала незамінним інструментом у лабораторних дослідженнях, зокрема під час автоматизованого зняття електронних характеристик напівпровідникових структур, таких як вольт-амперна характеристика [17]. Однією з ключових особливостей LabVIEW є графічний підхід до побудови програмної логіки. Замість написання текстового коду, користувач оперує блоками, які з'єднуються в логічну схему (мова G). Це дозволяє створювати повноцінні системи автоматизації навіть без знання класичних мов програмування, що особливо зручно для інженерів та дослідників. LabVIEW має розвинену систему математичних функцій.

Програма дозволяє застосовувати фільтри, згладжування, статистичний аналіз, знаходження похідних, інтегралів, а також виконувати спектральний аналіз (наприклад, перетворення Фур'є). Це дозволяє автоматично обробляти сигнали, відфільтровувати шум та отримувати чисті дані без додаткового втручання користувача.

Ще однією перевагою є можливість реєстрації даних та побудови звітів. Користувач може зберігати результати експериментів у таблицях Excel або автоматично генерувати звіти у PDF. Також підтримується передача даних у базу даних або хмарне середовище.

Важливим є те, що LabVIEW підтримує апаратну синхронізацію. Це особливо актуально при роботі з короткими імпульсами або перехідними процесами, де необхідно точно координувати роботу різних каналів вимірювання. Через використання внутрішніх або зовнішніх тригерів та таймерів можна точно керувати моментом зчитування та реакції системи.

Завдяки поєднанню інтуїтивності, потужності, підтримки обладнання та гнучкої логіки побудови систем, LabVIEW виступає як одне з найкращих рішень для автоматизації досліджень електронних характеристик напівпровідникових пристроїв у наукових, промислових і освітніх установах

Загалом, вищезгадані особливості роблять середовище LabVIEW незамінним інструментом для автоматизованого вимірювання та дослідження електронних характеристик напівпровідникових пристроїв, особливо у випадках, коли потрібна гнучкість, масштабованість і висока точність вимірювань.

## **2.2. Методика вимірювання вольт-амперних характеристик діодів на основі GaAs**

Структура досліджених промислових світлодіодів на основі GaAs наведена на рис.2. Використовувалися діоди, які були створені

епітаксіальним нарощуванням шарів з різними типами провідності на підкладку арсеніду галію типу.

Омічні контакти у переходів створювалися нанесенням сплаву золото – нікель.

Для збільшення інтенсивності випромінюваного світла промислові діоди зроблено конічної форми за допомогою механічного полірування.

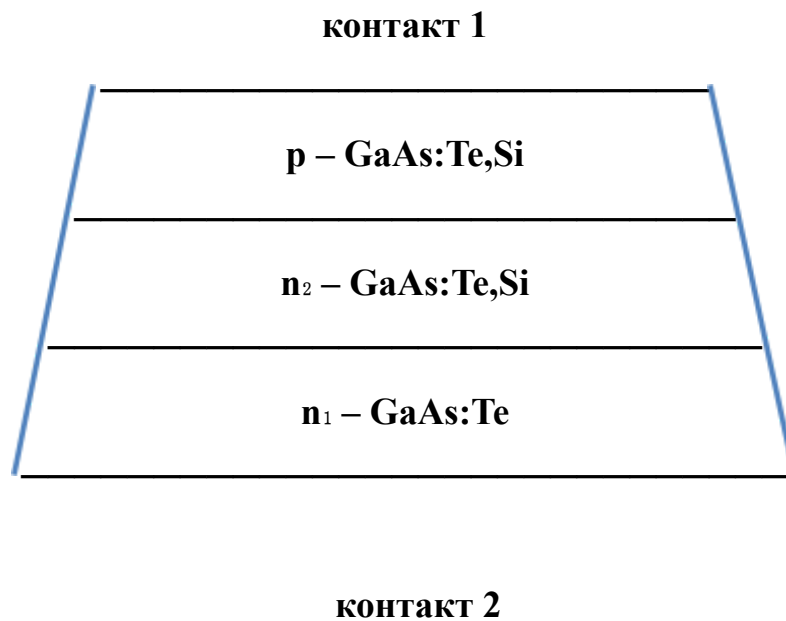


Рис.2. Схематичне зображення структури діодів на основі *GaAs*.

Принципова схема установки для вимірювання вольт- амперних характеристик в області малих струмів представлена на рис.4.

Живлення діоду здійснюється джерелом напруги (ДН). Напруга на ньому вимірюється вольтметром В1. Послідовно з діодом підключено опір. У таких схемах передбачається зміна опору перемикачем. Зазвичай величини опорів підбираються доволі великими, що дозволяє вимірювати малі струми. Зазвичай достатньо таких дискретних значень  $10$ ;  $10^2$  ;  $10^3$ ;  $10^4$ ;  $10^5$  Ом.

Згідно зі схемою, напруга на діоді буде дорівнювати:

$$U_D = U_1 - U$$

(2)

де напруга на ДН, – падіння напруги на опорі .

Струм, який проходить через діод, дорівнює струму, що проходить через послідовно включений опір R. За законом Ома величина цього струму буде дорівнювати:

$$I_R = U_R / R \quad (3)$$

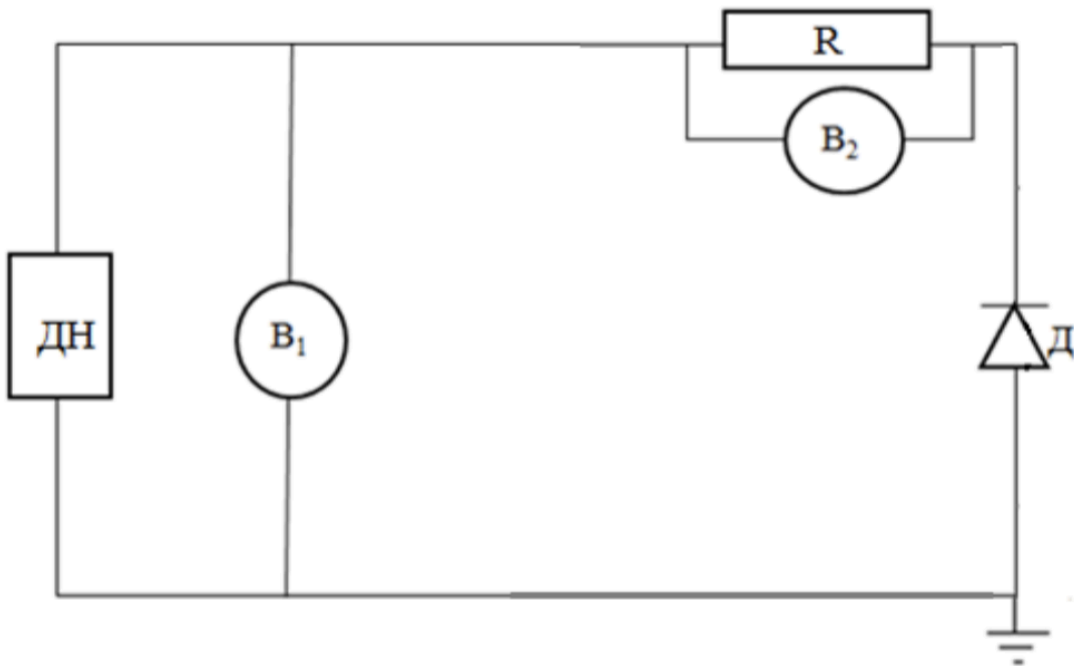


Рис. 4. Електрична схема установки  
для вимірювання ВАХ діодів

### 2.3. Вибір елементної бази для системи автоматизованої реєстрації

При створенні комплексу автоматичної реєстрації вольт-амперних характеристик необхідно забезпечити точність, надійність та економічність

системи. Елементна база обирається з урахуванням доступності, технічних характеристик і сумісності компонентів. Основними обраними елементами стали:

- 1.Мікроконтролер STM32F103C8T6 (64 кБ Flash, 20 кБ SRAM, 72 МГц, інтегрований АЦП);
- 2.Цифровий амперметр на базі INA219 (струм до  $\pm 3.2$  А, роздільність 0.8 мА);
- 3.Джерело живлення (DC-DC step-down на LM2596);
- 4.Резистори шунтування: 0.1 Ом, 1 Вт;
- 5.Варистор MOV для захисту від перенапруг;
- 6.Дисплей OLED 0.96" для відображення даних;
- 7.Конденсатори для згладжування: 100 мкФ і 10 мкФ (електролітичні і керамічні);
- 8.Роз'єми USB для підключення до ПК;
- 9.Перемикачі, кнопки, світлодіоди для індикації режимів.

Максимальна напруга, яку можна буде подавати на напівпровідниковий діод на основі *GaAs* - 1,2 В при прямому зміщенні, при цьому струм не повинен перевищувати 2 мА. Тоді максимальна потужність на зразку:  $P = U \times I = 5 \text{ В} \times 0.02 \text{ А} = 0.1 \text{ Вт}$ .

Таким чином розрахунок показує, що виділене тепло буде незначним і спеціального охолодження діодам не потрібно. Достатньо врахувати теплові втрати в самій платі та мікросхемах. Отже, навіть шунт потужністю 0.25 Вт матиме значний запас.

Для живлення системи необхідно обрати стабілізований блок на 5 В. У випадку живлення від USB-порту рекомендується використовувати стабілізатор напруги типу AMS1117. Якщо ж система автономна - інтегрується акумулятор із зарядним модулем TP4056. Орієнтовне споживання всієї системи не перевищує 2 Вт, що дозволяє реалізувати як стаціонарний, так і мобільний варіант комплексу.

Комплекс живиться від зовнішнього адаптера 9 В, що понижується за допомогою стабілізатора LM2596 до 5 В. Ця напруга подається на всі цифрові компоненти. Для аналогової частини (живлення операційного підсилювача) використовується додатковий стабілізатор AMS1117 (3.3 В).

Не менш важливим є аналіз роздільної здатності та відповідності рівнів сигналу. Якщо АЦП має 12 біт і опорне напруження 3.3 В, то один крок квантування становить приблизно 0.8 мВ. Така точність дозволяє зчитувати зміни струму навіть у зворотному режимі. У разі потреби можна перейти на 16-бітний АЦП, що дасть ще вищу роздільність. Крім того, уся система повинна бути узгоджена за рівнями сигналу: вихід підсилювача не має перевищувати діапазон допустимого вхідного сигналу АЦП, а мікроконтролер - мати достатню швидкодію для обробки даних. Зазвичай цього досягають шляхом правильного підбору інтерфейсів, буферних каскадів та внутрішньої оптимізації алгоритмів.

## **2.4. Опис принципової схеми для автоматизованого вимірювання ВАХ**

Принципова схема передбачає:

1. Генерацію напруги, що подається на досліджуваний зразок;
2. Вимірювання струму за допомогою шунта;
3. Подачу сигналів на АЦП мікроконтролера;
4. Обробку та передавання інформації до ПК;
5. Виведення графіка вольт-амперної характеристики в реальному часі.

Зразок з'єднується з джерелом живлення, а паралельно до нього - з модулем вимірювання струму. Напруга та струм знімаються та оцифровуються мікроконтролером, який формує набір точок (U, I) для подальшої побудови вольт-амперної характеристики.

Алгоритм функціонування комплексу наступний :

1. Користувач запускає програму на ПК або вбудованому дисплеї;
2. Комплекс ініціалізує мікроконтролер та модулі вимірювання;
3. Джерело живлення формує напругу в заданому діапазоні з кроком (наприклад, 0.1 В);
4. На кожному кроці система вимірює напругу та струм;
5. Після завершення сканування результати передаються на ПК;
6. Будується графік вольт-амперної характеристики;
7. За потреби результати зберігаються у файл або БД;

Реєстрація струму, що протікає через напівпровідникову структуру під дією прикладеної напруги, є центральною частиною експерименту. Зважаючи на малі значення струмів, які можуть бути у межах від наносекунд до мікроампер, необхідно використовувати високочутливі інструменти з підсиленням. У якості базового елемента вибрано інтегральний підсилювач струму типу INA219 або спеціалізований цифровий амперметр, наприклад, Keithley 6485, що дозволяє зчитувати значення з роздільною здатністю до 10 нА.

## 2.5 Аналіз ВАХ діодів на основі *GaAs*

На рис. 5 представлені елементи системи для автоматичного запису ВАХ. Для переключення вимірювань з прямого до зворотного напрямку використовувалися опори 1 кОМ та 100 кОМ.

На рис. 6. показано вікно програми, за допомогою якого здійснюється вибір режиму роботи для максимальної напруги 5 В і опору 981 Ом. Усереднення відбувається за 10000 точками вимірювань. Таким чином забезпечується велика точність вимірювання.



Рис. 5. Фрагмент установки для автоматизованого запису ВАХ.

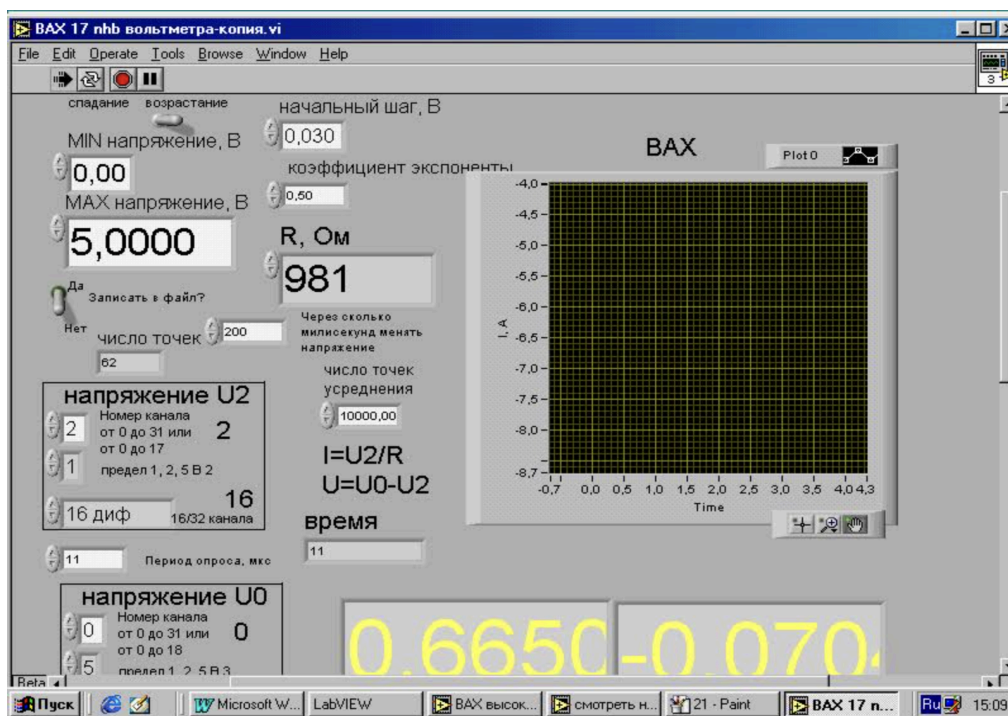


Рис. 6. Фрагмент вікна програми LabVIEW на моніторі комп'ютера.

На рис. 7 показано вікно програми з ВАХ зворотного струму досліджуваного діоду на основі арсеніду галію. Крива позначена білим кольором - вихідна ВАХ, крива позначена червоним кольором - виміряна через 20 хвилин.

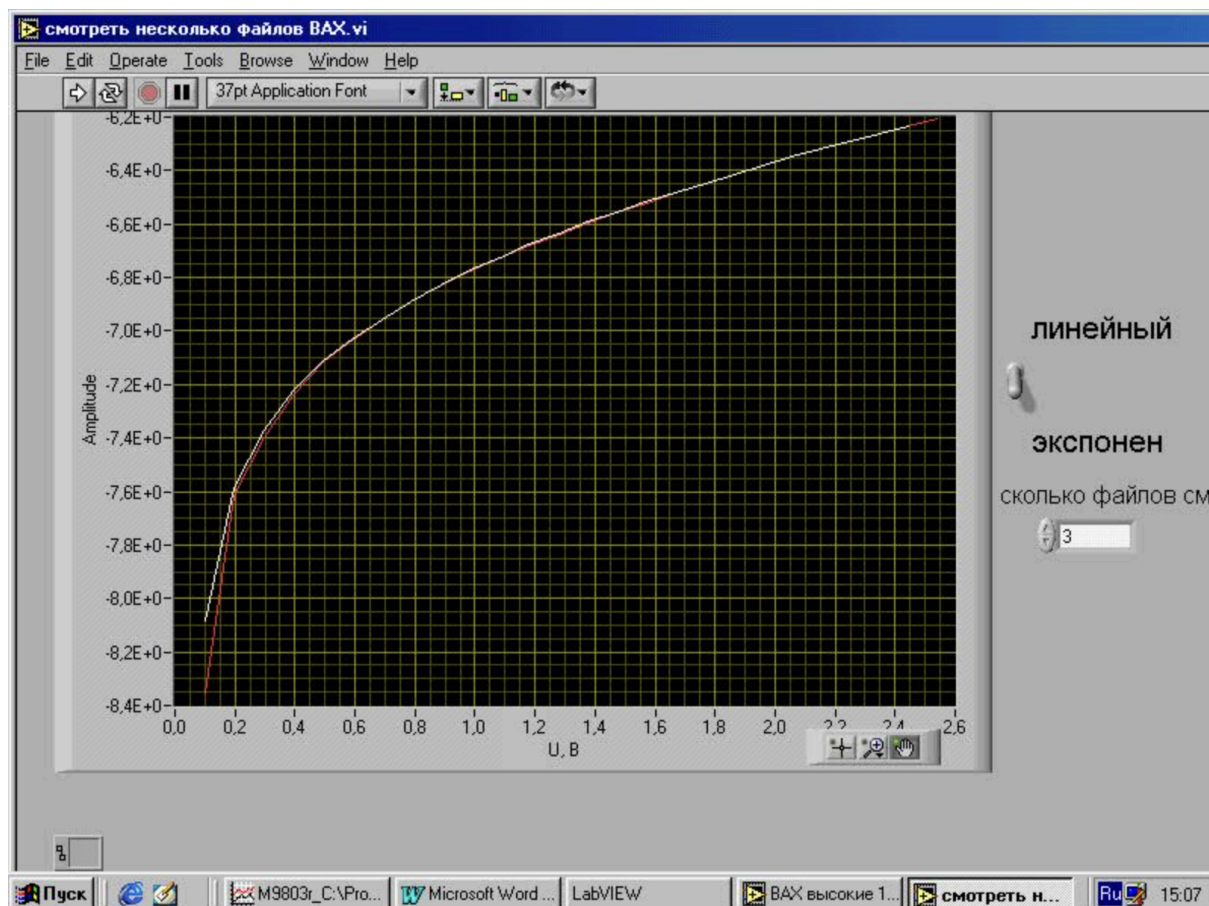


Рис. 7. ВАХ зворотного струму досліджуваного діоду на основі арсеніду галію, виміряне в автоматичному режимі

Співпадіння ВАХ при токах більших за  $10^{-7}$  А показує мінімальний струм, який вимірюється з великою точністю.

## **ВИСНОВКИ**

1. Дослідження вольт - амперних характеристик напівпровідникових структур дає можливість дослідити їх фізичні параметри, перспективи експлуатації, спрогнозувати терміни роботи, а також надати рекомендації по вдосконаленню і розробці нових приладів.
2. Розроблено експериментальну систему автоматичного вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням блочно - модульної системи і програми LabVIEW
3. Вимірювання вольт - амперних характеристик діодів на основі арсеніду галію за допомогою автоматизованої системи показали відтворюваність результатів та зручність обробки даних.
4. Дослідження вольт - амперних характеристик діодів на основі арсеніду галію за допомогою автоматизованої системи вимірювань показали суттєве скорочення часу експерименту при можливості повного збереженні та візуалізації отриманих результатів.
5. Робота підтвердила доцільність використання автоматизованих систем для вимірювання вольт- амперних характеристик з підвищенням точності, швидкості та ефективності проведених експериментальних досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Arduino.cc — офіційний сайт Arduino <https://www.arduino.cc>
2. STM32Cube IDE - середовище розробки від STMicroelectronics с. 1-237.
3. Raspberry Pi Foundation — офіційний сайт Raspberry Pi <https://www.raspberrypi.com>
4. Офіційний сайт National Instruments (розробник LabVIEW) <https://www.ni.com/uk-ua/shop/labview.html>
5. Документація на INA219 - [www.ti.com](http://www.ti.com) с. 1-35.
6. ДСТУ EN 61140:2014. Захист від ураження електричним струмом. с. 1- 47.
7. Писаренко Г.С. Електроніка: Підручник. - Київ: Либідь, 2019. с. 1-384.
8. Курлянчик Ю.Є., Петренко О.О. Віртуальні вимірювальні системи на базі LabVIEW”. — Київ: Ліра-К, 2021.- 326 с.
9. Смірнов С.В. Фізика напівпровідникових приладів. — К.: Техніка, 2005. – 255 с.

